

Таблица 1. Параметры деталей

Оборотное долото	Материал	Микроструктура лезвийной части	Твердость лезвийной части, HRC	Обработанная площадь одним долотом, га
РУП «МЗШ»	65Г	Троостит	45...50	17
Упрочненное	40Х	Азотсодержащий мартенсит	64...66	25
Kverneland	40ХГР	Мартенсит	50...55	25

выбравочными признаками, показал, что износ упрочненных деталей происходит медленнее серийно выпускаемых в 1,4...1,8 раз. Таким образом, результаты исследований и полевых испытаний позволили предложить технологии упрочнения деталей и внедрить на Минском заводе шестерен.

#### Заключение

1. Термоциклическая обработка с индукционным нагревом, примененная после нитроцементации, позволяет измельчить микроструктуру стали до 4...6 мкм, за счет чего повышается ударная вязкость как мартенситной структуры (35 Дж/см<sup>2</sup>), так и трооститной (60 Дж/см<sup>2</sup>). Многократные фазовые превращения приводят к образованию карбидов при охлаждении стали в цикле. Последующий быстрый нагрев не дает раствориться образованным карбидам, вследствие чего площадь карбидов в нитроцементованном слое больше в 2 раза, чем в диффузионном слое, полученном при стационарном процессе ХТО. Мелкодисперсная структура стали и высокодисперсные карбиды способствуют по-

вышению твердости слоя с 60 HRC (стационарный процесс) до 66 HRC (циклическая обработка).

2. Разработанная схема распределения микроструктур долота и технология упрочнения позволили создать деталь, состоящую из зон, для которых характерна определенная структура, обеспечивающая высокую твердость и износостойкость лезвийной части (легированный мартенсит), прочность и долговечность крепежной части (троостит). Разработка защищена патентом РБ.
3. Полевые испытания показали, что благодаря упрочнению деталей выпускаемых Минским заводом шестерен, их износостойкость сравнялась с западными образцами «Kverneland». Установлено, что износостойкость упрочненных деталей выше серийно выпускаемых деталей в 1,5...1,8 раз, в зависимости от типа почвы.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Checkliste zur Mengenermittlung für den Bedarf an Original Kverneland Ersatzteilen [Electronic resource]: Products & Distribution / Kverneland. – Mode access: <http://www.kvernelandgroup.com>.

Материал поступил в редакцию 03.10.11

#### TKACHENKO G.A. Thermal cyclic processing of details of soil-cultivating cars executed from constructional low alloyed steel

In work the European approach on hardening of steel products of soil-cultivating machines is analysed. It is established that the European manufacturers use medium-carbon steel containing alloying elements chrome, silicon, manganese and a bor. For increase of mechanical properties of a detail subject to the thermal processing consisting in quenching and tempering. Application of a high-quality and high-strength steel with thermal processing allows to form the complex of operational properties providing an operating time of products to 15 ... 25 hectare depending on conditions of a ploughed land. For home producers increase of competitiveness of own production consists in improvement of operational characteristics of products from already applied steels with chemical compound 0,4% C; 1% Cr, 0,65% C; 1,2% Mn. Received mechanical properties hardness 45 ... 50 HRC, impact strength of 25 J/sm<sup>2</sup> and breaking strength 1000 МПа provide an operating time of a detail to 15 hectares on soft soil. Therefore the technology consisting in nitrocementation of a surface of a product with the subsequent thermocyclic thermal processing, quenching and low tempering has been developed for reception high tribological and mechanical properties. As a result hardness on a surface has made 64. 66 HRC, impact strength to 60 J/sm<sup>2</sup> and an operating time to 25 hectares that is comparable to the European manufacturers.

УДК 621.793

Сокоров И.О., Нерода М.В.

### ЗАЩИТА ОТ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ВАЛОВ, ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

**Введение.** Термин «фреттинг» используется для обозначения малого колебательного скольжения между поверхностями двух контактирующих тел. Амплитуда такого движения обычно составляет 1–100 мкм. Изнашивание, возникающее при таком движении, называют фреттинг-изнашиванием [1].

Относительное скольжение является необходимым условием образования фреттинг-коррозии. При постоянной частоте колебаний изменение амплитуды относительного скольжения приводит к изменению скорости относительного перемещения поверхностей, что может сказываться на условиях трения. Это, в свою очередь, может привести к изменению интенсивности развития фреттинг-коррозии [2].

Некоторые экспериментальные данные показывают, что фреттинг-коррозия начинается при весьма малых величинах перемещения. Так, Томлинсон отмечает [3, 4], что повреждение поверхности

наступает даже тогда, когда относительное перемещение составляет несколько межатомных расстояний. Тем не менее часть исследований проводилась и при больших амплитудах (до 2 мм).

При анализе интенсивности фреттинг-коррозии важно установить границу значения амплитуд, которая определяла бы специфику условий разрушения поверхности при фреттинг-коррозии по сравнению с износом при обычном трении скольжения.

В нашем случае важно рассмотреть влияние на фреттинг-коррозию удельной нагрузки, которая зависит от площади контакта трибонапы (опорная поверхность вала – буксовая втулка подшипника). В процессе изнашивания изменяется площадь фактического контакта сопряженных поверхностей и глубина поверхностных слоев металла, принимающих участие в процессах трения и разрушения, следовательно, изменяется и удельная нагрузка.

Сокоров Игорь Олегович, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета. Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

Нерода Михаил Владимирович, зав. кафедрой технологии машиностроения Барановичского государственного университета. Беларусь, БарГУ, 225404, Брестская область, г. Барановичи, ул. Войкова 21.

В соответствии с тремя периодами протекания фреттинг-коррозии можно выделить три ведущих процесса, сопутствующих этим трем периодам. Первопричиной развития первого периода фреттинг-коррозии выступают интенсивно протекающие пластические деформации. Для второго периода ведущим процессом является окисление, а для третьего – разрыхление материала с образованием новых свободных поверхностей.

Повреждение контактирующих поверхностей в условиях фреттинг-коррозии определяется в основном рядом ведущих процессов – коррозионно-усталостными процессами, схватыванием и микрорезанием. Хотя эти процессы развиваются в поверхностном слое одновременно, однако, с учетом свойств контактирующих материалов и условий нагружения один из этих процессов становится ведущим и именно он, в основном, лимитирует ресурс работы контактирующих деталей. Такая дифференциация ведущих процессов позволяет рационально классифицировать методы защиты от того или иного ведущего процесса. Все способы защиты поверхностей условно подразделены на четыре основные направления [5]:

- а) конструктивно – технологические приемы;
- б) защита от схватывания;
- в) защита от усталостно-окислительного разрушения;
- г) защита от абразивного разрушения.

К первой группе относятся такие конструктивные и технологические решения, которые исключают микросмещение поверхностей (увеличение натяга для пресовых посадок, использование демпфирующих устройств для гашения вибраций, улучшение подвода смазочного материала, усовершенствование конструкций и т.д.).

Третья группа методов защиты – упрочнение контактирующих поверхностей механической, термической и химико-термической обработкой. Методы этой группы эффективны, когда в качестве ведущего фактора выступают усталостно – окислительные процессы. К ней относятся методы, уменьшающие коэффициент трения и исключающие окислительную среду в зоне контакта (применение смазок, металлических мыл, нанесение пленок и покрытий и др.).

Внешними признаками, указывающими на приоритет процессов схватывания при развитии фреттинг-коррозии, являются образование вырыва на одной поверхности и налипание частиц в виде наростов на другой. При дальнейшем перемещении наросты могут, подобно абразиву, диспергировать и деформировать сопряженную поверхность, а также способствовать образованию и развитию новых узлов схватывания.

Выявить ведущий процесс можно с достаточной степенью точности в результате микроскопического исследования поверхностей трения. При этом следы пластического течения металла, вырывы и налипание частиц металла, следы оплавления и размазывания, надрывы металла, следы окисления и хрупкого разрушения поверхностей и т.д. – это характерные изменения внешнего вида контактных поверхностей в процессе эксплуатации в условиях фреттинг-коррозии.

Проанализировав условия работы тяжело нагруженных валов технологического оборудования, характер повреждений их опорных поверхностей, которые являются лимитирующими срок службы данных деталей, было сделано предположение, что ведущую роль при их разрушении играет фреттинг-коррозия.

На основе проведенного анализа литературных данных по исследованию фреттинг-коррозии, влияния различных факторов (механического воздействия, химической активности окружающей среды, природы контактирующих материалов) на интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии, а также методов защиты от нее можно сделать вывод о том, что для обеспечения долговечности деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии и высоких удельных нагрузок, наиболее рациональным является нанесение на их рабочие поверхности покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Учитывая специфику таких деталей, как тяжело нагруженные валы, для нанесения покрытий на их рабочие поверхности применимы методы газотермического напыления покрытий.

Технологический процесс нанесения газотермического покрытия на металлическую поверхность включает следующие стадии:

- 1) подготовку поверхности перед нанесением покрытия с целью повышения энергии активации основы;
- 2) напыление покрытия;
- 3) последующую термическую и (или) механическую обработку.

Подготовка поверхности перед напылением производилась дробеструйной и лезвийной обработкой.

В рамках проведенных исследований напыление покрытий производилось в следующей последовательности – плазменное напыление подслоя из терморегулирующего материала и газопламенное напыление основной части ГТП из разработанных композиций.

Выбор исходных порошковых материалов для создания композиций с целью последующего получения газотермических покрытий производился исходя из соответствия их следующим условиям:

- высокого уровня физико-механических свойств покрытий, обеспечивающих защиту от различных видов износа (абразивного, фреттинг-коррозии) и прочность сцепления, гарантирующую работоспособность деталей с покрытиями;
- минимальной себестоимости композиций.

Первому условию соответствуют материалы на основе никеля, железа, медьсодержащие (бронзы, баббиты). Повышенный уровень свойств в покрытии прогнозируется в случаях наличия в исходном материале значительного количества легирующих элементов, способствующих повышению износостойкости, стойкости к фреттинг-коррозии, антифрикционных свойств и прочности сцепления. Это характерно для самофлюсующихся материалов на основе никеля и железа, бронзам. Терморегулирующие материалы за счет экзотермической реакции повышают температуру в зоне контакта напыляемого материала и основы, что способствует их проплавлению и повышению температуры в контакте «покрытие – основа», увеличивая тем самым прочность сцепления.

Второму условию удовлетворяют самофлюсующиеся сплавы на основе железа и материалы на основе меди. Кроме того, согласно [6], сопротивлением изнашиванию при фреттинг-коррозии обладают материалы на основе никеля, железа, алюминия, меди и содержащие карбиды хрома, титана, ванадия. Известна [7] композиция ПС-85Н70Х17С4Р4+15Ю10Н, стойкая к износу и фреттинг-коррозии.

В проводимых исследованиях, учитывая вышесказанное, целесообразным было признано изучить эффективность газотермического напыления композиционных покрытий на основе следующих материалов: самофлюсующихся материалов на основе железа, терморегулирующих – NiAl и медьсодержащих. Для составления композиций и проведения исследований были выбраны следующие компоненты: ПР-НД42СР (ТУ 14-127-309-01); ПГ-19М-01 (ТУ 48-4206-156-82); ПТ-НА-01 (ТУУ-322-19-004-96); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (ТУ 14-22-18-88).

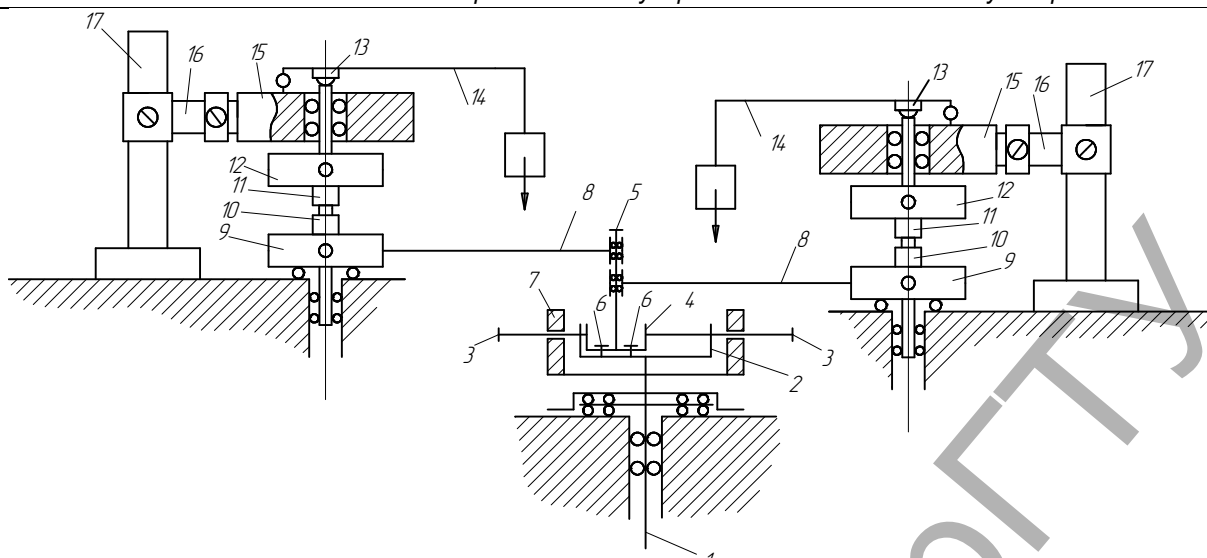
**Таблица 1.** Предложенные композиции для газотермического напыления

№ композиции	Состав композиции
1	ПТ-НА-01 + ПГ-19М-01 + ПР-Х4Г2Р4С2Ф
2	ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф + ПТ-НА-01

**Таблица 2.** Химический состав порошков

Марка порошка	Химический состав
ПТ-НА-01	основа Ni; 4,0-5,5% Al
ПР-Х4Г2Р4С2Ф	основа Fe; 3,7% Cr; 2,2% Mn; 3,8% B; 2,5% Si; 0,8% V
ПГ-19М-01	основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al
ПР-НД42СР	основа Ni – Cu; 42,5% Cu; 0,2% C; 0,9% Si; 1% B; до 3% Fe

Эксплуатационные свойства покрытий из исследуемых композиций сравнивались с соответствующими показателями для напыленных покрытий из самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 и стали 45. Выбор данных материалов для сравнения обусловлен тем, что первый наиболее распространенный среди защитных износостойких материалов, а сталь 45 является основным материалом, применяемым для изготовления деталей различного функционального назначения.



1 – вал-шпиндель, 2 – каретка, 3 – винт, 4 – подвижная каретка, 5 – ось, 6 – винт, 7 – подвижное кольцо, 8 – шатун, 9 – головка, 10 – подвижный образец (контртело), 11 – неподвижный образец, 12 – подвижная головка, 13 – сферический подпятник, 14 – рычаг, 15 – самоустанавливающийся узел, 16 – консоль, 17 – стойка

Рис. 1. Кинематическая схема установки для испытания на фреттинг-коррозию

При выборе оборудования и методики испытаний для проведения исследований фреттинг-коррозии необходимо выдержать ряд требований. С одной стороны, имитация фреттинг-коррозии в лабораторных условиях должна максимально приближаться к условиям возникновения этого вида поверхностного разрушения в реальных конструкциях. С другой стороны, выбранная методика должна давать возможность сопоставления полученных результатов с данными других работ. В связи со специфичностью условий возникновения фреттинг-коррозии к испытательным устройствам предъявляются следующие требования:

- свободное от люфтов крепление образцов в соответствующих зажимных устройствах;
- жесткость к перемещению образцов друг к другу и малая степень деформации устройства;
- наличие виброскользкого движения, регулируемой частоты и амплитуды;
- наличие контролируемой нормальной силы для создания необходимой удельной нагрузки.

Перечисленным требованиям к установкам и характеру контакта поверхностей отвечает экспериментальная установка, разработанная и изготовленная в БНТУ.

Выбранные наружный и внутренний диаметры образцов позволяют свести к минимуму эффект градиента скорости в радиальном направлении. Испытания образцов проводились согласно ГОСТ 23.211-80 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний металлов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии».

В установке положено в основу торцевое трение контактирующих образцов, выполненных в виде полого кольца (подвижный образец) и цилиндра (неподвижный образец).

Данная установка позволяет производить испытания при амплитуде относительного микроскольжения от 0 до 2000 мкм, частоте колебаний от 6 до 100 Гц (за счет установки шкивов и двухскоростного двигателя), удельной нагрузке до 400 МПа. На установке испытываются одновременно две пары образцов (эталон и испытуемый образец).

Определение оценок и доверительных интервалов, полученных результатов износа образцов при фреттинг-коррозии определяли согласно ГОСТ 11.004-74 «Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения».

Выбор параметров проведения испытаний проводился на основе теоретических исследований фреттинг-коррозии и условий работы валов. Результаты проведенных испытаний показаны на рисунках 2–5.

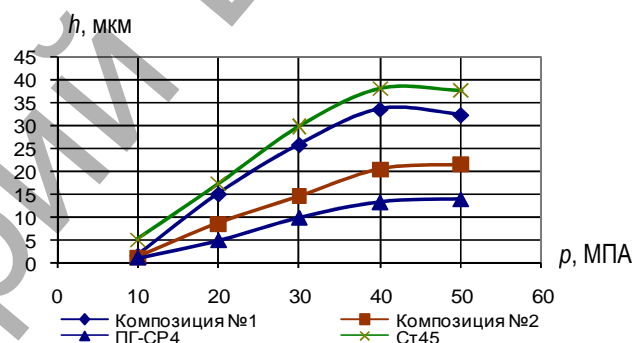


Рис. 2. Зависимость износа материалов от удельной нагрузки ( $A=0,06$  мм,  $N=1 \cdot 10^6$ ,  $f=25$  Гц)

Интенсивность изнашивания покрытий из разработанных композиций при удельной нагрузке до 40 МПа ниже, чем у стали 45 и износа для композиции № 1 не превышает 35 мкм, для композиции № 2 22 мкм. С увеличением нагрузки свыше 40 МПа интенсивность изнашивания как у покрытий из разработанных композиций, так и для стали 45 уменьшается, причем это уменьшение у композиции № 1 значительно больше, чем у других.

Такой характер зависимостей износа покрытий из разработанных композиций может быть объяснен следующим образом. При сравнительно небольших удельных нагрузках, до 30 МПа, преобладающим видом разрушения является схватывание и окислительный процесс. Так как в композиционных покрытиях на границах твердых составляющих происходит накопление дислокаций и вакансий, то из-за малой их подвижности на поверхностях скольжения не создаются центры схватывания. Второй причиной сравнительно низкой интенсивности изнашивания полученных покрытий при удельной нагрузке до 30 МПа являются меньшие температуры в зоне трения по сравнению со сталью 45, возникающие за счет прохождения упругих волн, что снижает интенсивность окислительных процессов у данных покрытий.

С увеличением удельной нагрузки примерно до 40 МПа интенсивность изнашивания как стали 45, так и полученных композиционных покрытий возрастает до максимального значения. На этой стадии износа происходит разрушение вследствие усталости выступов, создаются первичные продукты износа, часть из которых (Ni, Fe) окисляется. Аналогично для стали 45. Однако при разрушении покрытий большую часть продуктов износа составляют частицы пер-

вичных кристаллов, у стали 45 – железо. Интенсивность окислительных процессов при фреттинг-коррозии стали 45 выше, чем при аналогичном разрушении композиционных покрытий. Поэтому у образцов из стали 45 значительно интенсивнее происходит усталостное разрушение. С увеличением удельной нагрузки свыше 40 МПа интенсивность изнашивания образцов с покрытиями и из стали 45 уменьшается. Это явление может быть объяснено тем, что увеличение удельной нагрузки приводит к образованию большего количества продуктов изнашивания и их дроблению, что, в свою очередь, приводит к погашению относительного движения этой прослойки продуктов износа (улучшается отвод частиц из зоны трения, уравновешивая их возникновение) и создаются условия скольжения или качения продуктов износа между собой и поверхностями контакта, что приводит к снижению интенсивности изнашивания.

Зависимость интенсивности изнашивания образцов с покрытиями из разработанных композиций и из стали 45 от амплитуды колебаний имеет линейную зависимость (рисунок 3). Износ, независимо от природы материалов, прямо пропорционален величине амплитуды колебаний в исследуемом диапазоне значений.

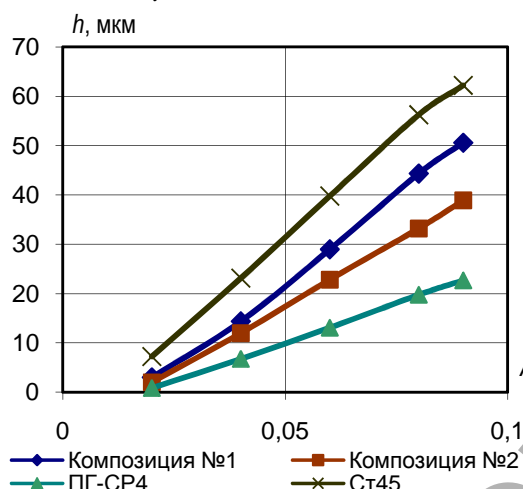


Рис. 3. Зависимость износа материалов от амплитуды колебаний ( $p=40$  МПа,  $N=1 \cdot 10^6$ ,  $f=25$  Гц)

При пониженных амплитудах скольжения интенсифицируются процессы локального абразивного действия продуктов износа и усталостного разрушения металла, усугубленные химической активизацией поверхностей трения. Эти процессы происходят интенсивнее при трении образцов из стали 45, поэтому и интенсивность изнашивания их выше по сравнению с напыленными образцами.

С увеличением амплитуды увеличивается вероятность контакта вновь образованных (химически активных) поверхностей и их схватывание. При этом не исключено, что с увеличением амплитуды колебаний микровыступы одной поверхности начинают интенсивнее взаимодействовать с неровностями сопряженной с ней поверхностью. В результате возрастает количество знакопеременных взаимодействий в пятнах фактического контакта, что приводит к усталостному выкрашиванию. Для образцов с покрытиями из разработанных композиций интенсивность указанных процессов ниже, чем для стальных образцов.

С увеличением частоты колебаний примерно до 25 циклов в секунду износ убывает до минимального значения и впоследствии стабилизируется.

Как отмечалось ранее, исходя из представлений различных исследователей И.М. Фенга, Г.Г. Улига, существует критическая частота, величина которой зависит от реакционной способности материала. Было установлено, что устойчивые к окислению материалы мало реагируют на изменение частоты колебаний и действительно, как показывают результаты проведенных экспериментов (рисунок 4), покрытия из разработанных композиций, содержащие твердые мелкодисперсные частицы, в меньшей степени реагируют на изменение частоты колебаний, чем сталь 45.

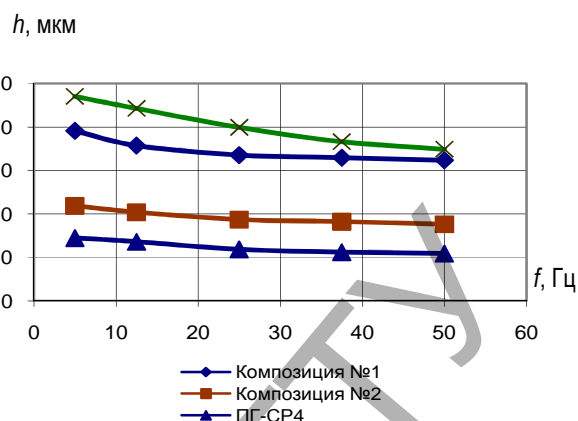


Рис. 4. Зависимость износа материалов от частоты колебаний ( $A=0,06$  мм,  $N=1 \cdot 10^6$ ,  $p=40$  МПа)

Снижение интенсивности изнашивания с увеличением частоты колебаний можно объяснить следующим образом: если считать, что абразивное действие отделившихся частиц металла зависит от степени их окисления, можно предположить, что при малых частотах колебаний вблизи металлической поверхности более вероятно образование твердых абразивных частиц окислов. При больших частотах плоскость раздела между окисленными и неокисленными частицами должна сдвигаться от металлической поверхности, так как скорость окисления частиц будет меньше. В этом случае интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии должна уменьшаться.

На характер повреждаемости при фреттинг-коррозии оказывает и температурный фактор. Температура в зоне контакта при увеличении частоты колебаний повышается менее интенсивно для покрытий по сравнению со стальными образцами вследствие более низкого коэффициента трения.

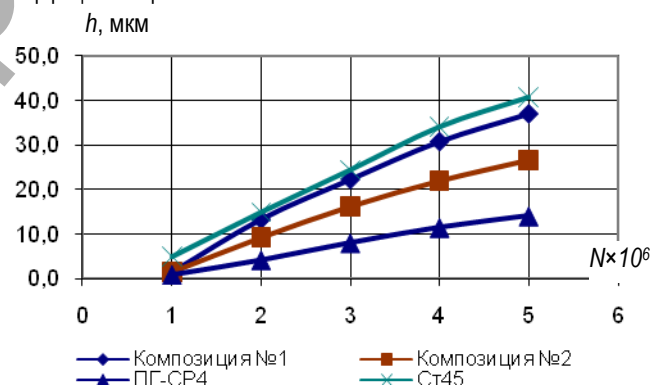


Рис. 5. Зависимость износа материалов от числа циклов ( $A=0,06$  мм,  $p=40$  МПа,  $f=25$  Гц)

Интенсивность разрушения при фреттинг-коррозии возрастает с увеличением количества циклов реверсивного нагружения. Из графика видно, что износ покрытий из разработанных композиций ниже, чем стали 45. Это можно объяснить, как и в предыдущих опытах, характером образования и разрушения окисных пленок, характером воздействия абразивных частиц, устойчивостью к окислению и т.п.

Следует отметить, что при количестве циклов выше  $3 \cdot 10^6$  интенсивность изнашивания испытываемых образцов как из стали 45, так и с покрытиями снижается. Это явление можно объяснить тем, что с увеличением количества циклов происходит накопление мелкодисперсных частиц (продуктов износа) в зоне контакта, что уменьшает металлический контакт, уменьшает относительное движение и создает условия их скольжения или качения между собой и поверхностями контакта.

В условиях фреттинг-коррозии и под действием высоких удельных нагрузок в процессе эксплуатации слабо упрочняющаяся пластичная

матрица легко переносится на сопряженную поверхность, предохраняет ее от повреждений и способствует релаксации напряжений. Это обуславливает высокую износостойкость полученных покрытий по сравнению со сталью 45 закаленной до 40–43 HRC (в 1,7–3 раза) и сравнимую с износостойкостью оплавленного сплава ПГ-СР4.

**Заключение.** Одним из перспективных методов защиты поверхности от изнашивания и коррозионных процессов при фреттинг-коррозии и повышения долговечности деталей машин является нанесение покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами газотермическими методами – газопламенным, плазменным с применением последующего оплавления напыленных покрытий. Поэтому предложено наносить промежуточный слой (подслой) плазменным напылением из термореагирующего материала NiAl с практически одновременным напылением основной части ГТП из разрабатываемых композиций газопламенным методом. Это позволило получить промежуточный слой с высокой прочностью сцепления за счет высокой скорости и высокой температуры частиц при плазменном напылении и свойств термореагирующего материала, что способствует увеличению времени протекания химической реакции, а также получить высокую прочность сцепления основного покрытия с подслоем и основой, за счет сокращения времени между операциями напыления (отпадает необходимость перенастройки плазменной установки на напыление основной части ГТП), это снизит количество образовавшихся оксидных пленок на поверхности и даст возможность напылять основную часть ГТП на подогретую основу после плазменного напыления. Кроме того, применение газопламенного метода не приведет к катастрофическому перегреву основы и сведет к минимуму вероятность развития усталостных процессов разрушения.

Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии покрытий из разработанных композиций во всем диапазоне удельных нагрузок, а также в зависимости от амплитуды от частоты колебаний ниже в 1,6–2,3 раза, чем стали 45 закаленной до 40–43 HRC и сопоставим со сплавом ПГ-СР4, в широком диапазоне относительных скоростей скольжения и удельных нагрузок. Интенсивность изнашивания значительно снижается с увеличением частоты колебаний, после увеличения ее значения свыше 25 Гц процесс изнашивания стабилизируется, не зависимо от типа материала.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hutchings, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials / I.M. Hutchings. – Cambridge, 1992. – P. 273.
2. Голеро, Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голеро, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля – Киев: Техніка, 1974 – 272 с.
3. Tomlinson, G.A. – "Proc. R. Soc.", A, 1927. – Vol. 115. – P. 472.
4. Tomlinson, G.A., Thorpe, P.L., Gough, H.J. – "Proc. Instn. Mech. Engers.". – Vol. 141, 1939. – P. 223.
5. Уотерхауз, Р.Б. Контактная коррозия // Усталость металлов. – М.: Ил, 1961. – С. 109–141.
6. Порошки для газотермического напыления и наплавки. Типы: ГОСТ 28377-89 – Введ 01.01.91.
7. Лабораторные работы по дисциплине «Основы повышения эксплуатационных свойств поверхностей» для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технология высокоэффективных процессов обработки материалов: в 2-х частях. / Н.В. Спиридонов, С.Э. Крайко, А.С. Володько. – Минск: БНТУ, 2003. – Ч.1 – 90 с.

Материал поступил в редакцию 13.10.11

#### SOKOROV I.O., NERODA M.V. Protection from fretting-corrosion of basic surfaces of hard loaded shaft, gas thermal evaporation

In given article are carried out researches of friction between surfaces of contacting bodies at availability of fluctuations of these bodies with amplitude of fluctuations from 1 up to 100 microns and wears of details under such circumstances (fretting-wear process).

In work experimental researches of wear of materials depending on a specific load, amplitude and frequency of fluctuations ph. On the basis of the received results of tests, for increase of durability of details of cars are executed, authors it is offered to put coverings with the certain physicomachanical both operational properties gas-flame and plasma in the ways. It is established, that the developed way allows to lower intensity of wear process of details of cars significantly.

УДК 538.3

Остриков О.М.

### НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ У ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА, ДЕФОРМИРУЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ, ПРИ НАЛИЧИИ КЛИНОВИДНОГО ДВОЙНИКА

**Введение.** Решение задач механики деформируемого твердого тела с учетом локализации напряжений на двумерных дефектах кристаллической решетки, к которым относятся границы двойника, имеет важное значение, так как позволяет более точно оценивать прочностные характеристики эксплуатируемого материала. При этом будет учитываться физическое явление, которое может оказать отрицательное влияние на прочность применяемого на практике материала, когда прогнозируемый ресурс прочностных свойств материала еще не исчерпан [1]. Это связано с тем, что границы двойников являются концентраторами больших внутренних напряжений и выступают инициаторами зарождения трещин [2].

Целью данной работы стал расчет с использованием макроскопической дислокационной модели полей напряжений в упругом полупространстве, деформируемом распределенной на отрезке нагрузке при наличии у поверхности клиновидного двойника.

**Постановка задачи и ее решение.** Поля напряжений в нагруженном упругом полупространстве при произвольном распределении нормальных  $p(x)$  и касательных усилий  $q(x)$  определяются

по формулам [3]:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^e(x, y) &= -\frac{2y}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)^2 ds}{[(x-s)^2 + y^2]^2} - \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)^3 ds}{[(x-s)^2 + y^2]^2}, \\ \sigma_{yy}^e(x, y) &= -\frac{2y^3}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s) ds}{[(x-s)^2 + y^2]^2} - \frac{2y^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s) ds}{[(x-s)^2 + y^2]^2}, \\ \sigma_{xy}^e(x, y) &= -\frac{2y^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s) ds}{[(x-s)^2 + y^2]^2} - \frac{2y}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)^2 ds}{[(x-s)^2 + y^2]^2}, \quad (1)\end{aligned}$$

где  $a$  и  $b$  определяют размер полосы, к которой приложена нагрузка (рисунок 1);  $s$  – параметр интегрирования.

Поля напряжений у клиновидного двойника, находящегося у поверхности кристалла, могут быть определены с использованием методики расчета, разработанной в [4]. При этом, поля напряжений у клиновидного двойника могут быть рассчитаны как суперпозиция

Остриков Олег Михайлович, к.ф.-м.н., доцент кафедры инженерной графики Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Беларусь, ГГТУ им. П.О. Сухого, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Машиностроение